

ESCALAMIENTO DE RESISTENCIA DE BLOQUES DE GRAN TAMAÑO DESDE ENSAYOS ESTANDARIZADOS (UCS Y CARGA PUNTUAL).

D. Castillo Arriagada¹, J. Montenegro Cooper², S. Villalobos Cifuentes³

RESUMEN:

En diversas áreas de ingeniería geotécnica es necesaria la caracterización de enrocados de diferentes tipos y tamaños, la compresión simple es el parámetro más importante para caracterizar el comportamiento de la roca matriz. Debido a la gran dimensión de las partículas de estos materiales, es una dificultad la estimación de la resistencia a la compresión simple de estos bloques, considerando la fuerte dependencia de sus discontinuidades, planos de estratificación y vetillas presentes en el macizo.

Aquí nace la motivación de este estudio, enfocado en encontrar alguna vinculación o factor escala que permita establecer correlaciones pudiendo así describir el comportamiento de la resistencia a la compresión simple para probetas de distintos tamaños. Esto se llevara a cabo mediante la ejecución de ensayos de resistencia a la compresión simple, ensayos de carga puntual y una caracterización petrológica de la roca.

Los resultados de la prueba de compresión simple obtenidos en laboratorio sugieren que la fuerza de compresión simple tiene una tendencia ascendente hasta cierto diámetro y luego de este descende, esta tendencia fue ratificada con el índice de carga puntual, obtenido del ensayo de carga puntual. Este comportamiento fue comparado con el modelo USEL.

Los resultados proponen que el efecto de tamaño en la Resistencia a la compresión simple de probetas de igual esbeltez pero diferentes tamaños tiene un comportamiento Ascendente-Descendente, se propone una estandarización de probetas para el estudio del efecto escala, con el fin de identificar las zonas de inflexión.

PALABRAS CLAVES: Efecto escala., resistencia a la compresión Simple., USEL.

ABSTRACT:

In several areas of geotechnical engineering it is necessary the characterization of rock mass of different types and sizes, simple compression is the most important parameter to characterize the behavior of the matrix rock. Due to the large dimension of the particles of these materials, it is a difficulty to estimate the resistance to simple compression of these blocks, considering the strong dependence of their discontinuities, stratification planes and stalks present in the massif.

Here the motivation of this study is born, focused on finding some linkage or scale factor that allows establishing correlations, being able to describe the behavior of the resistance to the simple compression for samples of different sizes. This will be carried out through the execution of test of resistance to simple compression, punctual load test and petrographic characterization of the rock.

The results of the simple compression test obtained in the laboratory suggest that the simple compression force has an upward trend up to certain diameter and afterwards it descends, this behavior was compared with the USEL model.

The results propose that the size effect in the resistance to the simple compression of specimens of equal slenderness but different sizes has a Ascending- Descending behavior, it is proposed a standardization of test specimen for the study of the scale effect, in order to identify the ones of inflection

KEYWORDS: Scale effect., Resistance to simple compression., USEL.

¹ Daniela Alejandra Castillo Arriagada, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, dcastillo@ing.ucsc.cl

² Profesor guía, José Miguel Montenegro Cooper, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, Jmontenegro@ucsc.cl

³ Profesor informante, Sergio Villalobos Cifuentes, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, svillalobos.ic@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

La caracterización del macizo rocoso es esencial para obras de ingeniería y minería, en general, para cualquier proyecto que atravesase una formación rocosa y sea necesario caracterizar grandes bloques de diferentes tipos, formas y tamaños. La resistencia a la compresión simple es el parámetro más importante para caracterizar el comportamiento de una roca matriz. A pesar de ser un ensayo sencillo, su estimación se dificulta por varias razones entre las que se puede mencionar: acceso y ubicación de grandes bloques, correcta extracción y preparación de muestras, muestras representativas y sin discontinuidades (planos de estratificación, diaclasas, fallas, etc.). Así nace la necesidad de establecer correlaciones empíricas que permitan establecer un comportamiento escalado, con el fin de optimizar los tiempos empleados en la obtención de estos parámetros.

La Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1975) define el efecto de escala de una probeta, como la influencia que tiene el tamaño de una muestra de roca matriz (sin discontinuidades) sobre las propiedades mecánicas de ésta. Por tanto, la resistencia a la compresión simple de una roca depende de las dimensiones de una probeta, y más específicamente del diámetro de ésta (considerando idéntica esbeltez). Esta tendencia ha sido objeto de estudio desde el siglo pasado, siendo pionero el estudio de Weibull (1959), el que propone un estudio estadístico más conocido como modelo del eslabón más débil. Otros estudios experimentales destacados son de Mogi (1962), Bieniawski (1968), Nishimatsu et al. (1969), Pratt et al. (1972) y Wijk et al. (1978), los que reflejan tendencias de comportamiento para rocas sedimentarias e ígneas en probetas de distinta esbeltez y tamaños. Los estudios previamente mencionados sirvieron de base para plantear el primer modelo empírico relacionado con el efecto escala, que introducen Hoek y Brown (1980). El citado modelo relaciona el decrecimiento de la UCS con el aumento del diámetro de probetas cilíndricas, plasmando esta tendencia en la Ecuación 1 y gráficamente en la **Figura 1**. Hoek y Brown sugieren que la constante empírica K , tiene un valor constante igual a 0,18 (adimensional).

$$(1) \quad \sigma_c = \sigma_{c50} \left(\frac{d}{50} \right)^{-k}$$

Donde:

σ_c : Resistencia a la compresión simple de una probeta de diámetro d

σ_{c50} : Resistencia a la compresión simple característica obtenida en una probeta de 50 mm de diámetro

K : Constante empírica adimensional

Hawkins (1998) llevó a cabo estudios en varias rocas sedimentarias, considerando diámetros desde 38 mm a 54 mm. El autor observa un comportamiento de la UCS ascendente en las probetas de menor diámetro, hasta alcanzar un valor máximo, y posteriormente éste desciende a medida que aumenta el diámetro de la muestra. Este fenómeno se muestra en la **Figura 2**, pudiendo observarse un comportamiento diferente al modelo propuesto por Hoek y Brown.

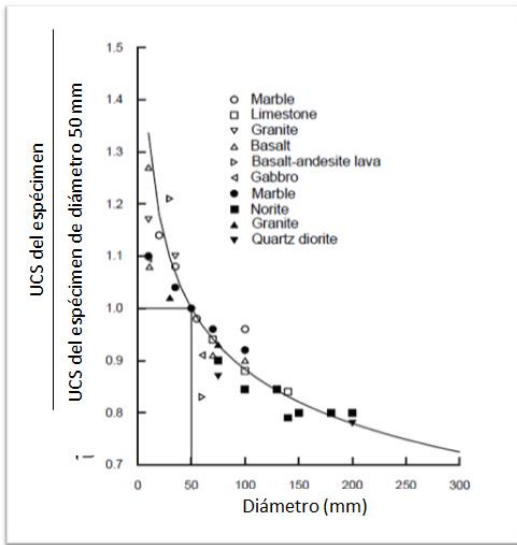


Figura 1: Efecto de escala de la resistencia a la compresión simple de una roca intacta (extraído y modificado de Hoek, 2000)

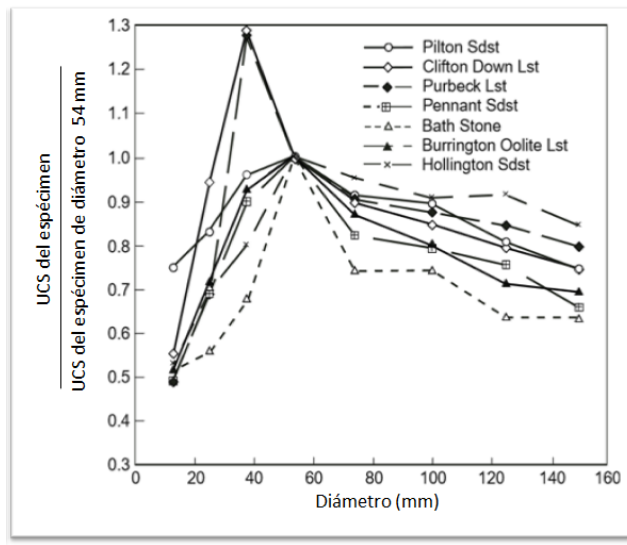


Figura 2: Resultados de la UCS de siete rocas sedimentarias (extraído y modificado de Hawkins, 1998).

Yoshinaka et al. (2008), en la misma dirección que Hawkins, observó un comportamiento ascendente-descendente para roca graníticas. En este caso los diámetros inferiores a 63 mm presentaron un comportamiento ascendente, mientras que diámetros mayores redujeron su tensión normal de compresión máxima (UCS) a medida que el diámetro de la probeta aumenta. Yoshinaka et al. (2008) compara sus resultados con los obtenidos por Kmadibrata y Jones (1993) en roca basáltica y porfídica, alcanzando la misma tendencia mencionada anteriormente.

Existen varias investigaciones que contradicen el modelo empírico propuesto por Hoek y Brown (1980), entre los que se pueden mencionar los trabajos de Masoumi et al. (2012 a, 2012 b, 2014 y 2015). El citado autor hace hincapié a las limitaciones que presenta el modelo empírico de Hoek y Brown, entre las que se puede destacar que el modelo solo se basa en resultados de ensayos de compresión uniaxial existentes hasta esa fecha, dejando fuera el efecto escala en otros ensayos, tal como los estudios de Bieniawski (1975), Sobre el efecto escala en el ensayo de carga puntual. Además Masoumi et al. (2014) ratifica que el valor de la constante empírica (K) no debe ser constante, si no que varía según el tipo de roca y su fábrica.

El modelo USEL (Masoumi et al., 2014) reproduce el comportamiento de probetas de roca cilíndricas e idéntica esbeltez, las que a medida que aumentan en diámetro, incrementan su resistencia a la compresión simple hasta cierto diámetro (modelo FFSEL de Bazant, 1983), y por encima de éste, se observa un decrecimiento de la UCS en las muestras de roca (modelo SEL, Bazant, 1997). Esta tendencia fue estudiada por Masoumi, el cual se basó en modelos de teoría de la energía de fractura (modelo FFSEL de Bazant, 1983) y en la ley de la fractura en efecto del tamaño (modelo SEL, Bazant, 1997)), correspondiendo a la combinación de estos dos modelos al que actualmente se denomina modelo USEL. La representación gráfica del citado modelo puede verse en la **Figura 3**, así como en las Ecuaciones 2 y 3, para una tendencia ascendente y descendente, respectivamente. La ecuación 4 representa la intersección de los dos modelos, donde d_i representa el diámetro de la probeta cilíndrica.

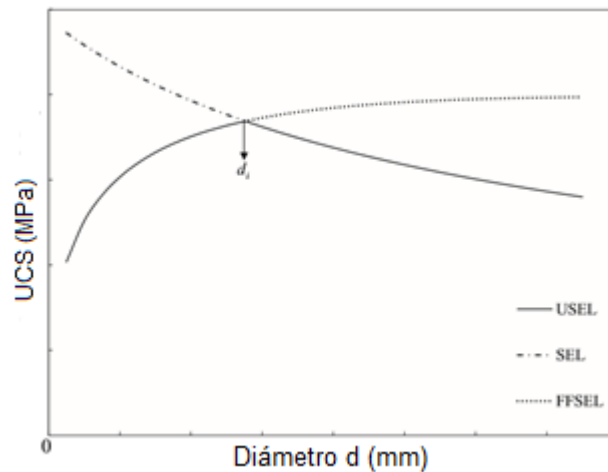


Figura 3: Representación gráfica del Modelo USEL (modificado de Masoumi et al., 2015), el que incluye los modelos FFSEL (Bazant, 1983) y SEL (Bazant, 1997).

$$(2) \quad \sigma_N = \frac{Bf_t}{\sqrt{1 + (d/\lambda d_0)}}$$

$$(3) \quad \sigma_N = \frac{\sigma_0 d^{(d_f-1)/2}}{\sqrt{1 + (d/\lambda d_0)}}$$

La intersección entre los modelos ocurre cuando:

$$(4) \quad d_i = \left(\frac{Bf_t}{\sigma_0} \right)^{2/(d_f-1)}$$

Complementando lo indicado anteriormente, Masoumi et al. (2016) propusieron las constantes para estudiar rocas sedimentarias empleando el modelo USEL mediante la ecuación general. La Tabla 1 muestra los parámetros propuestos por el citado autor con los que se puede aplicar dicha metodología.

Tabla 1: Parámetros adimensionales del modelo USEL para rocas sedimentarias (Masoumi et al., 2016).

Muestra de Roca:	Constantes del modelo USEL				Predicción de la intersección
	Bf_t	λd_0	σ_0	d_f	d_i
Roca sedimentaria	1,62	106,08	0,19	2,11	47,54

Por último, reagrupando las Ecuaciones 2, 3 y 4, junto con las constantes de la Tabla 1, Masoumi et al. (2016), propone la Ecuación 5, normalizada a una probeta de 25 mm de diámetro.

$$(5) \quad UCS = \begin{cases} UCS_{25} \frac{0,19d^{0,56}}{\sqrt{1+(d/106,08)}} & \text{si } (d < 47,5\text{mm}) \\ UCS_{25} \frac{1,62}{\sqrt{1+(d/106,08)}} & \text{si } (d > 47,5\text{ mm}) \end{cases}$$

Esta investigación analizará la influencia del tamaño sobre la resistencia a la compresión simple, describiendo a continuación los materiales y el procedimiento empleado, para esto se realizaron una serie de ensayos de resistencia a la compresión simple (UCS) usando una prensa de compresión y ensayos de carga puntual, en muestras cilíndricas de diferentes diámetros. Estos ensayos fueron regidos por las normas que establecen la ISRM y la ASTM y sus resultados fueron comparados con la caracterización petrológica de la roca. Adicionalmente, los resultados obtenidos serán comparados con la literatura actual sobre el efecto escala, para verificar y/o proponer nuevas correlaciones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

El presente estudio empleó muestras de arenisca, clasificada como roca sedimentaria. Las que fueron extraída en Caleta Maule, sector Lagunillas, Comuna de Coronel (ver **Figura 4**) las muestras de roca se extrajeron de un macizo rocoso que se encuentra aproximado a 2 km de la costa de la playa de la caleta. Cecioni et al. (1997) definen las rocas de la zona de estudio como “areniscas marinas con facies continentales intercaladas, portadoras de mantos de carbón” pertenecientes a la formación Curanilahue, tal y como puede apreciarse en el mapa geológico de la **Figura 5**.

El talud del que se extrajeron muestras de arenisca, presenta vegetación en su coronación (ver **Figura 6**), así como ligeros cambios de tonalidad de la roca. En general, se extrajeron bloques de tamaño medio a grande, color blanquecino, compacto y resistentes al tacto, como se observa en la imagen de la **Figura 7**. Los bloques fueron resondeados para obtener probetas de diferentes diámetros usando una testiguera (ver **Figura 8**).



Figura 4: Mapa de ubicación, extraído de Google Earth, 10/07/2017

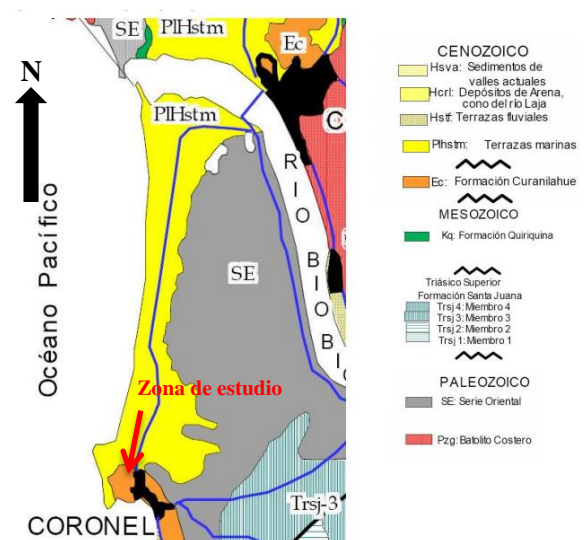


Figura 5: Marco geológico de la comuna de Coronel, Modificado de Lézep (2002)



Figura 6: Talud empleado para recoger bloques de arenisca.



Figura 7: Bloque de arenisca de gran tamaño recogido de terreno.



Figura 8: Resondeo mediante testiguera de bloque de arenisca en el laboratorio para obtener probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro.

2.2 Ensayos de laboratorio

Los ensayos de laboratorio han sido divididos en tres etapas diferentes: i) reconocimiento petrológico, ii) ensayos de compresión simple, y iii) ensayos de carga puntual. A continuación se describirán cada uno de ellos.

2.2.1 Reconocimiento petrológico

El reconocimiento petrológico tiene por objeto analizar la formación de la roca, se requiere conocer los procesos de erosión, transporte y sedimentación producidos particularmente en rocas sedimentarias. Es importante saber si el material fue arrastrado por acción eólica, olas marinas, gravedad, acción antrópica, etc. Estos procesos pueden ser continuos en el tiempo o por segmentos, todo esto se ve reflejado en la forma y selección de granos que presenta la roca Folk (1980).

El procedimiento empleado para analizar las muestras de arenisca fue observarlo bajo el microscopio estereoscópico educacional Leica EZ4 HD perteneciente al laboratorio de geología de la UCSC (ver **Figura 9**). El sistema de iluminación LED de 7 direcciones proporciona luz incandescente, oblicua y transmitida para iluminación y contraste de alta calidad. Adicionalmente, se cuenta con el sistema óptico Greenough, el cual ofrece una vista tridimensional del material.



Figura 9: Microscopio estereoscópico Leica EZ4 HD laboratorio de geología de la UCSC

2.2.2 Ensayo de compresión simple (UCS)

En la realización del ensayo de compresión simple se resondearon tres muestras cilíndricas por cada diámetro (50, 60, 100 y 150 mm (ver **Figura 10**), a excepción de las de 25, 46 y 60 mm en las que solo se prepararon dos debido a varios intentos fallidos finalizaron con probetas quebradas o con planos de debilidad. El procedimiento empleado para la realización de este ensayo siguió la directrices establecidas en las normas de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 2007) y las de la Sociedad Americana de Ensayos de Materiales (ASTM, D2938-95). Asimismo, se ha tenido en consideración que las probetas no presenten micro defectos en su estructura (ver **Figura 11**). Cabe señalar que todas las probetas tienen una esbeltez de 2 (relación altura/diámetro de 2). Según la citada normativa, la carga se aplicada continuamente a una velocidad de 0,05 MPa/s, teniendo en consideración que la duración del ensayo varíe entre un mínimo de 5 y un máximo de 10 minutos.

Los ensayos se realizaron usando una prensa de compresión a carga controlada modelo MATEST YIMCI109NC (ver **Figura 12** y **Figura 13**). La resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de la muestra se determina mediante la Ecuación 6.

$$(6) \quad \sigma_c = \frac{F}{A}$$

Dónde:

- σ_c : Resistencia a la compresión simple
- F : Fuerza máxima aplicada
- A : Sección transversal de la probeta



Figura 10: Probetas cilíndricas de varios diámetros: 25, 50, 60, 100 y 150 mm.



Figura 11: Probeta cilíndrica de 50 mm de diámetro.



Figura 12: Ensayo de probeta de 100 mm de diámetro efectuado en máquina Matest



Figura 13: Ensayo de probeta de 150 mm de diámetro efectuado en máquina Matest

2.2.3 Ensayo de carga puntual

Las muestras que serán ensayadas mediante el ensayo de carga de puntual han sido preparadas siguiendo las normas ISRM, por lo que serán ensayadas en su dirección diametral tal como se puede observar en la **Figura 14**, se usaron probetas de 25, 50 y 100 mm de diámetro, con una relación de diámetro-altura 1:2, se ensayaron 3 probetas por diámetro (Ver **Figura 15**).

El equipo usado es una celda de carga, la cual es operada manualmente a una velocidad de carga constante hasta la falla, el ensayo debe durar entre 10 y 60 segundos y se registra la carga máxima para calcular el índice de resistencia de carga (I_s) con la Ecuación 7.

$$(7) \quad I_s = \frac{P}{D^2}$$

Donde

I_s : Índice de resistencia de carga

D : Diámetro de la probeta

P : Carga máxima

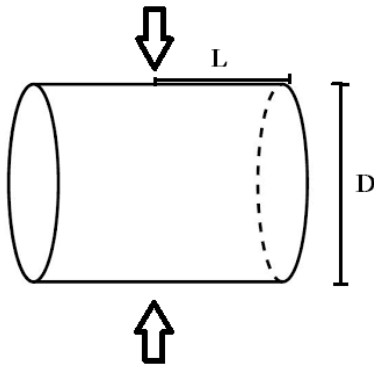


Figura 14: Esquema de ensayo de carga puntual



Figura 15: Ensayo carga puntual efectuado sobre probeta de 100 mm de diámetro.

La ISRM (2007) establece una relación entre los ensayos de compresión simple y carga puntual, la cual se advierte en la Ecuación 8. El factor de corrección (K) varía entre 18 y 26, dependiendo del tipo de roca.

$$(8) \quad UCS = K * I_s$$

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSION

A partir del análisis petrológico realizado utilizando el microscopio estereoscópico se han podido deducir las principales características de la roca, tal como color pardo claro, grado de compactación poroso y alto grado de coherencia (ver **Figura 16** y **Figura 17**.) La roca tiene textura detrítica de fábrica grano soportada, estimándose un porcentaje de arena de 70% y el resto de limo y arcilla. Los minerales presentan una buena selección con un cemento de composición silícea.

Analizando en profundidad las fotografías efectuadas con el microscopio se advierten cristales de cuarzo (40 %) y plagioclasas (25 %). En la **Figura 17** puede verse con claridad la existencia de dos tipos de componentes oscuros: i) minerales de biotita (13%) y ferromagnesianos (hornblenda 2%), de forma tubular o columnar, y ii) clastos líticos ígneos de forma redondeados (15%). El 5% restante se divide entre micas y en menor cantidad cloritas (mineral de color anaranjado que se observa en la figura 16).

Según la clasificación de Folk (1980) para rocas sedimentarias, el material estudiado se clasifica texturalmente como una arenisca fangosa, mientras que la clasificación composicional le asigna el nombre de litoarenita feldespática. El análisis efectuado se resume en tabla adjunta en el anexo 1 para la clasificación de rocas sedimentarias.

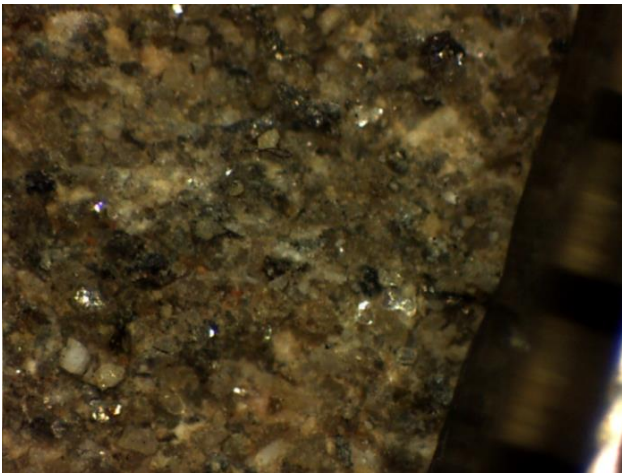


Figura 16: Minerales presentes en la arenisca obtenida con el microscopio Leica EZ4HD, la mina presente en la imagen (inferior izquierda) sirve de escala, corresponde a una mina de 0,5 mm de diámetro.

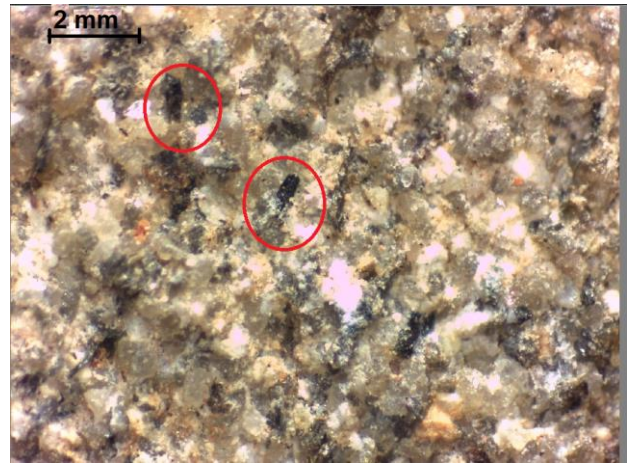


Figura 17: Minerales oscuros presentes, obtenida con el microscopio Leica EZ4HD, se puede observar la diferente forma entre minerales ferromagnesianos (círculos rojos) e ígneos.

Los resultados de los ensayos de compresión simple y los de carga puntual efectuada a probetas de arenisca para diferentes diámetros se resumen en la Tabla 2. La resistencia a la compresión simple aumenta a medida que se incrementa el diámetro de las probetas, alcanzando un valor máximo con las de diámetro igual a 50 mm. La pendiente en el tramo ascendente alcanza una razón de 0,9 MPa/mm. La tensión de compresión máxima alcanzada por las probetas de diámetros superiores a los del valor máximo, decrece hasta cerca de los 25 MPa con probetas de 150 mm de diámetro. Lo indicado anteriormente puede verse claramente en la **Figura 18**, en la que se muestra la variación de la resistencia a la compresión simple de las probetas a medida que aumentan su diámetro. La pendiente en este último tramo es suave y con una razón de descenso de -0,13.

Tabla 2: Resultados de la resistencia a la compresión simple y de la carga puntual obtenidos en el laboratorio.

Diámetro (mm)	Resistencia a la compresión simple [MPa]	Resistencia a la compresión simple media (UCSC) [MPa]	Índice de carga puntual (I_s) [MPa]	Índice de carga puntual medio (I_s) [MPa]
25	28,39	28,35	1,44	1,61
	28,31		1,57	
46	47,42	47,35	-	-
	47,28		-	
50	47,47	47,65	2,20	2,29
	47,83		2,36	
	47,65		2,35	
60	43,57	43,58	-	-
	43,59		-	
100	31,88	32,63	1,65	1,61
	33,76		1,57	
	32,24		-	
150	25,47	25,77	-	-
	26,07		-	

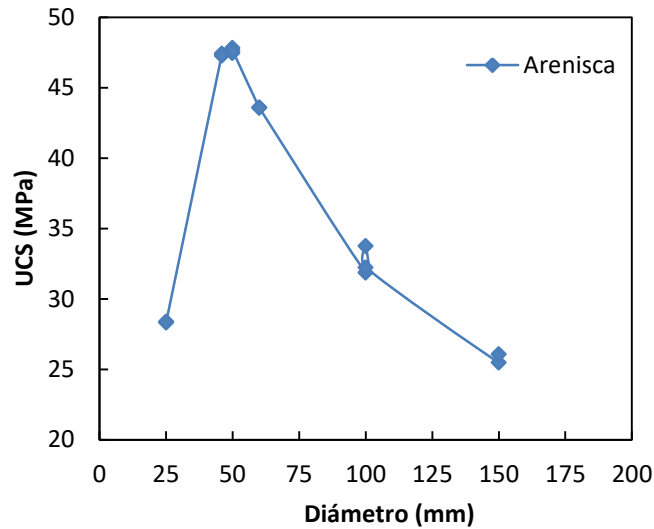


Figura 18: Variación de la resistencia a la compresión simple a medida que aumenta el diámetro de las probetas.

Relacionando los ensayos de compresión simple y el de carga puntual se determina el factor K de la Ecuación 8 propuesta por la ISRM (2007), alcanzando un valor de 20, encontrándose dentro del rango habitual de rocas sedimentarias. Los resultados obtenidos en el ensayo de carga puntual presentan la misma tendencia que la observada con el de compresión simple, tal como se muestra en la **Figura 19**. Es decir, el Índice de carga puntual se incrementa hasta ensayar probetas de 50 mm de diámetro. Por encima de este valor el índice descende.

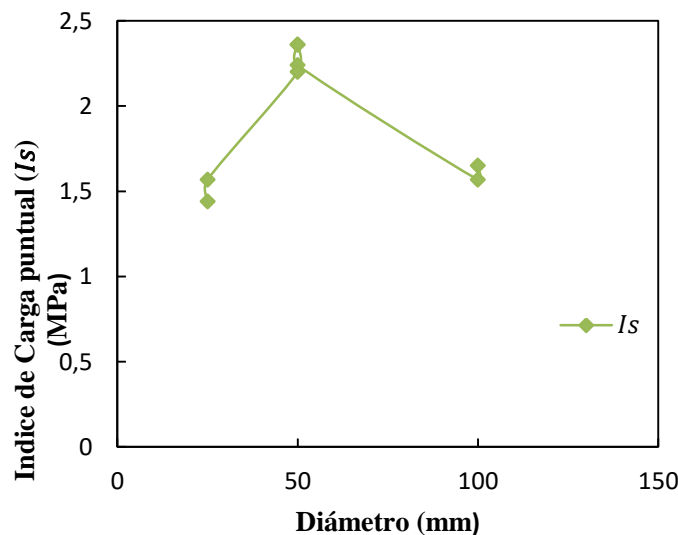


Figura 19: Variación del Índice de carga puntual (MPa) a medida que aumenta el diámetro de las probetas.

Finalizado el análisis experimental de los ensayos efectuado en el laboratorio, se procederá a comparar los resultados obtenidos con el modelo USEL, explicado anteriormente.

Utilizando la Ecuación 5 (modelo USEL) junto a los valores de la Tabla 2 para rocas sedimentarias, se puede establecer el comportamiento de la resistencia a la compresión simple de probetas de diferentes tamaños a partir del resultado de una probeta de 25 mm. La comparación entre los resultados obtenidos en el Laboratorio de Geotecnia con los estimados con el modelo USEL puede verse en la Tabla 3.

Tabla 3: Comparación entre los resultados obtenidos en el laboratorio con los estimados con el modelo USEL

Diámetro (mm)	Resistencia a la compresión simple media (UCS) [MPa]	Modelo USEL [MPa]	Promedio Índice de carga puntual *K I_s [MPa]
25	28,35	29,39	30,08
46	47,35	38,39	-
50	47,65	37,86	45,78
60	43,58	36,70	-
100	32,63	32,95	32,17
150	25,77	29,56	-

Los resultados de los ensayos de compresión simple y los de carga puntual realizados en el Laboratorio de Geotecnia-UCSC coinciden adecuadamente con el comportamiento propuesto por la ley de efecto de tamaño unificada (modelo USEL). La **Figura 20** muestra la variación de la tensión de compresión máxima (UCS) con el diámetro de las probetas, habiendo sido graficados utilizando los ensayo de compresión simple (curva color celeste) y los de carga puntal (curva color verde), así como las estimaciones realizadas mediante el modelo USEL (curva color rojo) (Ecuación 5). La zona en la que se observa la mayor pendiente corresponde entre los diámetros de 25 y 50 mm. El modelo USEL propone como diámetro en el que se produce la resistencia máxima a una probeta de 47 mm., No obstante, los resultados obtenidos en el laboratorio indican que el máximo corresponde con una probeta de 50 mm de diámetro.

La probeta de 25 mm de diámetro alcanza unos 30 MPa de resistencia a la compresión simple, tanto en el modelo USEL como en los resultados de resistencia a la compresión simple. Por otro lado, en las probetas de 150 mm se obtuvo aproximadamente una tensión normal de compresión máxima similar a la obtenida en la probeta de 25 mm, al menos con el modelo USEL. El modelo USEL (Masoumi et al., 2016) no especifica claramente la razón por la que estandariza en probetas de diámetro igual a 25 mm. A partir del análisis de los resultados obtenidos en laboratorio, se plantea la hipótesis de que esa coincidencia sería la explicación a la estandarización a los 25 mm.

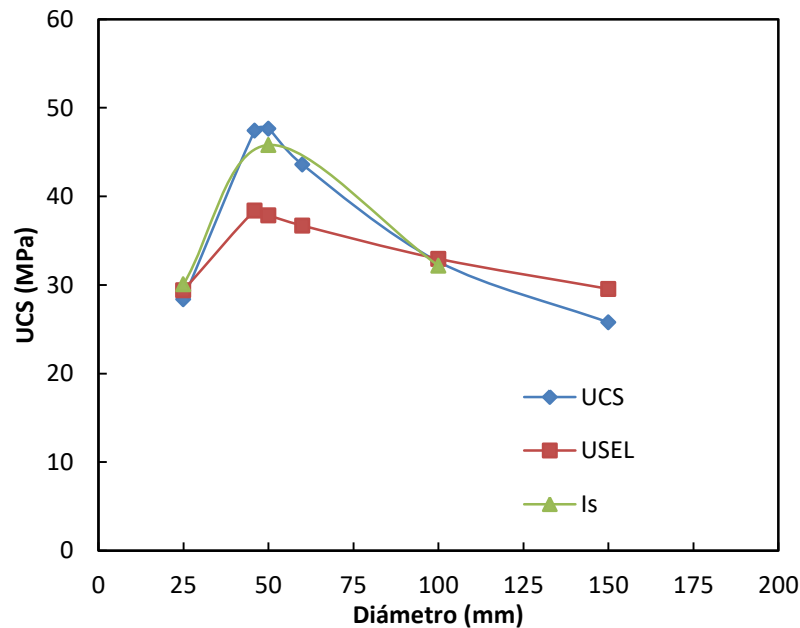


Figura 20: Variación de la resistencia a la compresión simple con el diámetro de las probetas obtenida mediante ensayos de laboratorio (tanto el de la tensión normal de compresión máxima como el de carga puntual) y el modelo USEL (Ecuación 5)

4. CONCLUSIONES

Los ensayos de laboratorio realizados han servido de base para verificar la tendencia de comportamiento del efecto escala. La resistencia a la compresión simple aumenta hasta cierto diámetro, y por encima, desciende hasta mantener un valor constante. Tanto el ensayo de compresión simple como el ensayo de carga puntual, reflejan la misma tendencia.

Es de gran interés enfocar el estudio en el rango de inflexión del comportamiento de la resistencia a la compresión simple. El modelo USEL propone como punto de inflexión la probeta de 47 mm de diámetro, en cambio los resultados experimentales demuestran que la fuerza de compresión alcanzó su máximo valor en una probeta de 50 mm.

Se propone estandarizar el estudio del efecto escala en la fuerza de compresión, estableciendo un rango de probetas mínimos, comprendido entre probetas de 25, 40, 50 100 mm de diámetro. Con el objetivo de identificar cual es la probeta de diámetro d , la que corresponda al punto de inflexión, y además establecer con las demás probetas la pendiente de cada tramo ascendente y descendente.

La estandarización del modelo USEL usando solo una probeta de 25 mm de diámetro, fue una interrogante durante las etapas iniciales de la investigación. Finalmente y luego de haber realizado las pruebas de laboratorio, se llegó a la conclusión de que dicha estandarización corresponde, a que la fuerza de compresión simple, mantiene su magnitud constante a pesar de tener una zona de curvatura comprendida entre los diámetros 25 y 150 mm, luego de esto la fuerza de compresión es constante, o se mantiene en los 30 MPa.

5. REFERENCIAS

American Society of Testing and Materials (ASTM) (2002) Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens, D2938-95(R02).

American Society of Testing and Materials (ASTM) (2008) Standard Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances, D4543-08.

American Society of Testing and Materials (ASTM) (2010) Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures, D7012-10

Bazant, Z. P. (1983). "Size effect in blunt fracture: Concrete, rock, metal." *Journal. Engineering. Mechanic.*, 10.1061/(ASCE) 0733-9399(1984)110:4(518),518–535.

Bazant, Z. P. (1997). "Scaling of quasi brittle fracture: Hypotheses of invasive and lacunar fractality, their critique and Weibull connection." *Int.J. Frac.*, 83(1),41–65.

Bieniawski, Z. T. (1968). "The effect of specimen size on the compressive strength of coal." *International. Journal. Rock Mechanic. Min.Sci.*, 5(4),325–335.

Bieniawski, Z. T. (1975). "The point-load test in geotechnical practice." *Engineering Geology*. 9(1),1–11.

Cecioni, A., Pineda, V., Quezada, J., Astudillo, J. (1997). *Geología Ambiental de Coronel, Chile Centro Sur: una Sinopsis Preliminar*. VII Congreso Geológico Chileno, Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas Vol. 1.

Folk, R. L. (1980). "Petrology of sedimentary rocks." Hemphill Publishing Company

Hawkins, A.B. 1998. "Aspects of rock strength." *Bulletin of Engineering Geology Environment*. 57: 17-30.

Hoek, E., & Brown, E. (1997). *Estimación de la Resistencia de Macizos Rocosos en la Practica (A)*.

Hoek, E. & Brown, E. (1980). *Underground excavations in Rock*. Institution of Mining and Metallurgy. Stephen Austin and Sons Ltd. Hertford, London, p 527.

Hoek, E. (2000) *Rock engineering course notes by Evert Hoek*. 2006 ed.

ISRM (International Society for Rock Mechanics). (1975). *Terminology (English, French, German)*. 70, 80.

ISRM (International Society of Rock Mechanics). (2007). "The complete suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006 ISRM." R. Ulusay and J. A.Hudson (eds.), *Suggested methods prepared by the commission on testing methods, Compilation arranged by the ISRM Turkish National Group, Kozanofset, Ankara*.

Krmadibrata, S., Jones, I.O., (1993). "Size effect on strength and deformability of brittle intact rock." In: Cunha, P. (Ed.), *Scale Effect in Rock Masses*. Balkema, pp. 277–284.

Lépez, L. (2002). "Análisis estructural del triásico de Santa Juana al sur y occidente del río Bío-Bío, VIII región, Chile".(Memoria de título) Universidad de Concepción. Concepción.

Masoumi, H., Douglas, K. J., Saydam, S., & Hagan, P. (2012 a). "Experimental study of size effects of rock on UCS and point load tests." In *46th Us Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association.

Masoumi, H., K. Douglas, J, and A.R. Russell. (2012 b). "Experimental investigation of the size effect of Gosford sandstone." in *11th Australia New Zealand Conference on Geomechanics*. Melbourne, Australia, 15-18 July.

Masoumi, H., M. Bahaaddini, G. Kim, and P. Hagan. (2014). "Experimental investigation into the mechanical behavior of Gosford sandstone at different sizes." in *8th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, ARMA*. US, Minnesota.



- Masoumi, H., Saydam, S., and Hagan, P. C.** (2015). “Unified size-effect law for intact rock.” *Int J Geomech*, DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000543.
- Masoumi, H., Roshan, H., & Hagan, P. C.** (2016). “Size-Dependent Hoek-Brown Failure Criterion.” *International Journal of Geomechanics*, 04016048.
- Mogi, K.** (1962). “The influence of dimensions of specimens on the fracture strength of rocks.” *Bulletin of the Earthquake Research Institute*. 40: 175-18.
- Nishimatsu, Y., U. Yamagushi, K. Motosugi, and M. Morita.** (1969). “The size effect and experimental error of the strength of rocks.” *Journal of Mining and Material Process Institute of Japan*. 18: 1019-1025.
- Pratt, H. R., Black, A. D., Brown, W. S., and Brace, W. F.** (1972). “The effect of specimen size on the mechanical properties of unjointed diorite.” *Int.J.RockMech.Min.Sci.*,9(4),513–529.
- Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D.** (2005). *Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física*. (8.a edición)
- Wijk, G., Rehbinder, G., and Logdstrom, G.** (1978). “The relation between the uniaxial tensile strength and the sample size for Bohus granite.” *RockMech.RockEng.*, 10(4), 201–219.
- Yamaguchi, U.** (1970, March). “The number of test-pieces required to determine the strength of rock.” In *International Journal of rock Mechanics and Mining Sciences & Gemechanics Abstract* (vol. 7, No 2, pp. 209-227). Pergamon.
- Yoshinaka R., Osada M., Park H., Sasaki T. and Sasaki K.** (2008) “Practical determination of mechanical design parameters of intact rock considering scale effect.” *Engineering Geology* 96: 173–186.
- Weibull, W.** (1951). “A statistical distribution of function of wide applicability.” *Journal of Applied Mechanics*. 18: 293-297.



ANEXO 1

FICHA DE DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE ROCAS SEDIMENTARIAS

1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

Color: Pardo Claro.
Grado de Compactación: Poroso.
Grado de Coherencia: Coherente.

2. TEXTURA

-Tipo de textura: Detrítica
-Si la roca tiene textura detrítica indique el tipo de Fábrica: grano soportada
-Tamaño (indique %) TEXTURA DETRITICA: grava: 0 % arena: 60 % limo/arcilla: 40 %=100%
Si la roca tiene textura detrítica indique la selección Buena Selección

3. Composición PARA ROCAS DE TEXTURA DETRÍTICA/CLÁSTICA

Componentes terrígenos		%	Diám. Máx.	Diám. Mín.	Esfericidad	Redondez
Mono minerales	Cuarzo	40	0,1mm	0,01mm	80%	80%
	Feldespato K	-	-	-	-	-
	Plagioclasas	24	0,1mm	0,01mm	40%	40%
	Micas	15	0,2mm	0,1mm	-	.
	Ferromagnesian: Otros	2	-	-	-	-
Líticos	Indiferenciados Ígneos Sedimentarios Metamórficos	15	0,1mm	0,01mm	40%	40%
Componentes alloquímicos: %		-	-	-	-	-
Fragm. Fósiles Oolitas etc. Otros (indicar)					No corresponde	No corresponde
Componentes volcanoclásticos						
Esquirlas de vidrio Ceniza volcánica Otros						
Restos carbonosos					No corresponde	No corresponde
Color pardo, blando, poroso					No corresponde	No corresponde
Pardo oscuro-negro, semibrillante						
Negro, brillante, compacto						

**Recalculé al 100% los porcentajes de Cuarzo, Feldespatos y Líticos: Q: 73 % F: 0 % L: 27
%=100%**

4. Composición del (los) cemento (s): Cemento Silíceo

5. Clasificación

- TEXTURAL: Arenisca Fangosa.
- COMPOSICIONAL: Lito-arenita Feldespática

6. Observaciones (estructuras sedimentarias, alteración, etc):